Capitolul 2

PRINCIPIUL I AL TERMODINAMICII

Principiul I al termodinamicii, denumit şi **principiul conservării energiei,** exprimă bilanţul tuturor formelor de energie ce intervin într-un proces termodinamic şi se enunţă astfel: ***Variaţia energiei unui sistem este egală cu energia transferată între sistem şi mediul ambiant***.

In termodinamică, energia transferată poate fi căldura şi lucrul mecanic:

$$\Delta E_{12} = Q_{12} - L_{12} \qquad [\mathrm{J}]$$

sau

$$Q_{12} = \Delta E_{12} + L_{12} \qquad [\mathrm{J}]$$

Remarcă: Lucrul mecanic are semnul minus datorită convenţiei de semne (lucrul mecanic efectuat asupra sistemului este negativ).

Energia sistemului (E), reprezintă suma tuturor energiilor la scara întregului sistem, şi anume, energia internă, energia cinetică, energia potenţială, etc.

$$E = U + \frac{m\,w^2}{2} + m\,g\,z + \ldots \qquad [\mathrm{J}]$$

Alte formulări echivalente ale Principiului I sunt:

- *Energia unui sistem termodinamic izolat se menţine constantă.*

- *Nu se poate realiza o maşină termică cu funcţionare continua care să efectueze lucru mecanic fară a consuma o cantitate echivalentă de energie.*

- *Este imposibil de realizat un perpetum mobile de speţa I.*

Principiul I al termodinamicii poate fi exprimat şi sub formă de fluxuri:

$$\frac{dE}{d\tau}=\frac{\delta Q}{d\tau}-\frac{\delta L}{d\tau}=\dot{Q}-P \qquad [W]$$

unde $dE/d\tau$ este viteza de variaţie a energiei, $\dot{Q}$ este fluxul termic iar P este puterea.

Principiul I în cazul sistemelor închise se enunţă astfel: ***Căldura şi lucrul mecanic transferate în cadrul unui proces ciclic, între un sistem termodinamic închis şi mediul înconjurător, sunt echivalente***.

$$\oint \delta Q=\oint \delta L \qquad [J]$$

Analiza termodinamică a unui sistem termodinamic închis (de masă constantă) se aplică unei mase de control.

Se consideră două cicluri care trec prin punctele de stare 1 şi 2. Pentru ambele cicluri, procesul deschis 1-a-2 este comun, în timp ce închiderea ciclurilor se realizează pe calea 2-b-1 pentru primul ciclu şi pe calea 2-c-1 pentru al doilea ciclu.

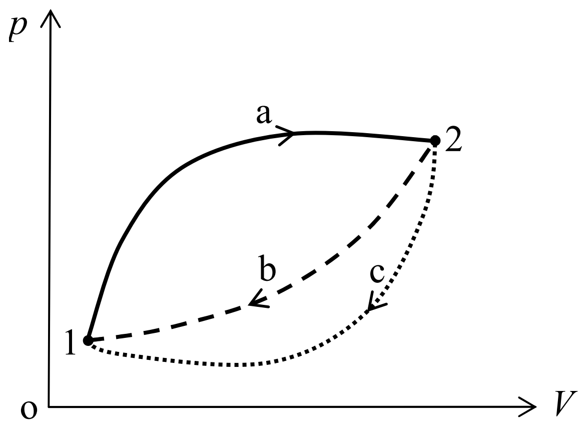

Fig. 2.1: *Reprezentarea grafică a ciclurilor în diagrama* $p-V$

Conform Principiului I, pentru primul ciclu putem scrie:

$$\int_{1-a}^{2}\delta Q+\int_{2-b}^{1}\delta Q=\int_{1-a}^{2}\delta L+\int_{2-b}^{1}\delta L$$

iar pentru al doilea ciclu:

$$\int_{1-a}^{2} \delta Q + \int_{2-c}^{1} \delta Q = \int_{1-a}^{2} \delta L + \int_{2-c}^{1} \delta L$$

Făcând diferenţa între prima şi a doua ecuaţie, se obţine:

$$\int_{2-b}^{1} \delta Q - \int_{2-c}^{1} \delta Q = \int_{2-b}^{1} \delta L - \int_{2-c}^{1} \delta L$$

sau

$$\int_{2-b}^{1} (\delta Q - \delta L) = \int_{2-c}^{1} (\delta Q - \delta L)$$

Remarcă: Oricare ar fi calea aleasă pentru al doilea proces deschis, 2-b-1 sau 2-c-1, valoarea integralei este aceeaşi. Prin urmare, expresia de sub integrală nu depinde de drum şi deci reprezintă o mărime de stare a sistemului, numită **energie internă**. Expresia matematică a Principiului I pentru sisteme închise se poate scrie, în formă diferenţială, astfel:

$$dU = \delta Q - \delta L = \delta Q - p\,dV \qquad [\mathrm{J}]$$

sau în formă integrală:

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1 = Q_{12} - L_{12} \qquad [\mathrm{J}]$$

Ţinând cont de definiţia entalpiei:

$$dH = dU + d(pV) \qquad [\mathrm{J}]$$

rezultă:

$$dU = dH - d(pV) \qquad [\mathrm{J}]$$

$$dH - d(pV) = \delta Q - p\,dV \qquad [\mathrm{J}]$$

şi deci:

$$dH = \delta Q + V\,dp \qquad [\mathrm{J}]$$

Principiul I în cazul sistemelor deschise: Se consideră un sistem termodinamic deschis în care intră cantitatea elementară de substanţă dm_1 şi iese cantitatea elementară de substanţă dm_2.

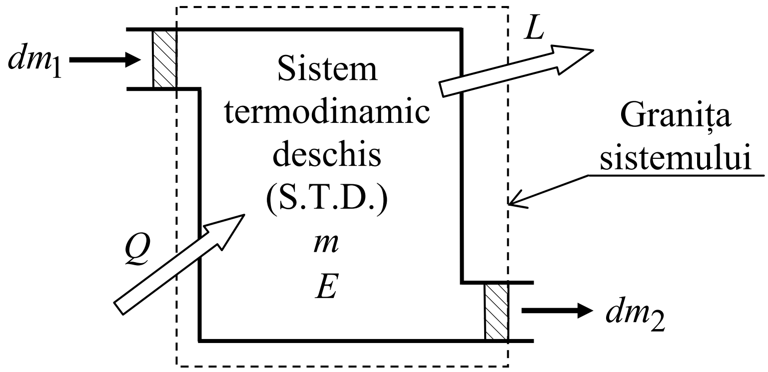

Fig. 2.2: *Sistem termodinamic deschis*

Ecuația de conservare a masei exprimă bilanțul de masă pentru sistemul analizat. Masa acumulată într-un sistem este egală cu diferența dintre masa care intră în sistem şi masa care iese din sistem, în intervalul de timp considerat:

$$dm = dm_1 - dm_2 \qquad [\text{kg}]$$

Ecuația de conservare a masei poate fi exprimată şi sub forma de fluxuri. Viteza de acumulare a masei în sistem este egală cu diferența dintre debitul masic care intră în sistem şi debitul masic care iese din sistem:

$$\frac{dm}{d\tau} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \qquad [\text{kg/s}]$$

Ecuația de conservare a energiei se aplică în ipoteza că sistemul termodinamic analizat este în regim staționar iar forțele de frecare sunt neglijabile.

$$\delta Q - \delta L = dE \qquad [\text{J}]$$

Lucrul mecanic efectuat de sistem este compus din lucrul mecanic tehnic şi lucrul mecanic de dislocare:

$$\delta L = \delta L_t + \left(p_2\, v_2\, dm_2 - p_1\, v_1\, dm_1\right) \qquad [\text{J}]$$

Variația elementară a energiei sistemului termodinamic va fi:

$$dE = e_2\, dm_2 - e_1\, dm_1 \qquad [\text{J}]$$

unde e_1 este energia specifică sau energia masică a sistemului la starea 1 şi e_2 energia specifică sau energia masică a sistemului la starea 2.

Rezultă:

$$\delta Q - \delta L_t - \left(p_2\, v_2\, dm_2 - p_1\, v_1\, dm_1\right) = e_2\, dm_2 - e_1\, dm_1 \quad [\mathrm{J}]$$

$$\delta Q - \delta L_t = \left(e_2 + p_2\, v_2\right) dm_2 - \left(e_1 + p_1\, v_1\right) dm_1 \quad [\mathrm{J}]$$

Considerăm că energia specifică masică a sistemului este compusă din energie internă, energie cinetică şi energie potențială:

$$e = u + \frac{w^2}{2} + g\, z \quad [\mathrm{J/kg}]$$

Rezultă că:

$$e + p\, v = u + \frac{w^2}{2} + g\, z + p\, v = h + \frac{w^2}{2} + g\, z \quad [\mathrm{J/kg}]$$

şi deci expresia Principiului I pentru sisteme deschise va fi:

$$\delta Q - \delta L_t = \left(h_2 + \frac{w_2^{\;2}}{2} + g\, z_2\right) dm_2 - \left(h_1 + \frac{w_1^{\;2}}{2} + g\, z_1\right) dm_1 \quad [\mathrm{J}]$$

sau în formă integrală:

$$Q_{12} - L_{t12} = m_2 \left(h_2 + \frac{w_2^{\;2}}{2} + g\, z_2\right) - m_1 \left(h_1 + \frac{w_1^{\;2}}{2} + g\, z_1\right) \quad [\mathrm{J}]$$

şi sub formă de fluxuri:

$$\dot{Q}_{12} - P_{u12} = \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{w_2^{\;2}}{2} + g\, z_2\right) - \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{w_1^{\;2}}{2} + g\, z_1\right) \quad [\mathrm{W}]$$

În cazul în care debitele masice la intrarea în sistem şi ieşirea din acesta sunt egale, se obține:

$$q_{12} - l_{t12} = h_2 - h_1 + \frac{1}{2}\left(w_2^{\;2} - w_1^{\;2}\right) + g\left(z_2 - z_1\right) \quad [\mathrm{J/kg}]$$

Aplicații ale Principiului I al Termodinamicii

Laminarea fluidelor: Se consideră un fluid având debitul masic constant şi care trece printr-un ventil de laminare sau printr-o diafragmă montată într-o conductă orizontală. Sistemul este adiabatic şi nu efectuează lucru mecanic.

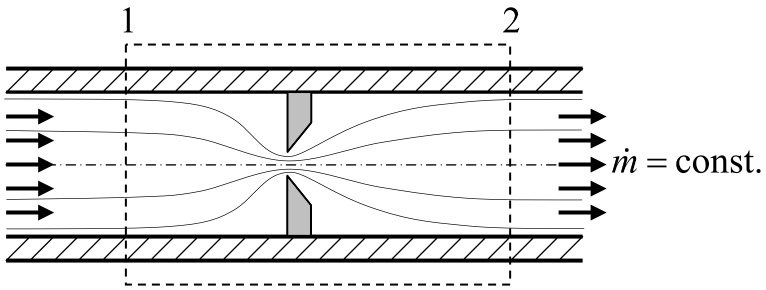

Fig. 2.3: *Laminarea fluidelor*

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \qquad \text{[kg/s]}$$

$$z_1 = z_2 \qquad \text{[m]}$$

$$\dot{Q}_{12} = 0 \qquad \text{[W]}$$

$$P_{u12} = 0 \qquad \text{[W]}$$

Rezultă din expresia Principiului I pentru sisteme deschise:

$$0 = \left(h_2 + \frac{w_2^{\ 2}}{2} \right) - \left(h_1 + \frac{w_1^{\ 2}}{2} \right)$$

sau

$$h_1 + \frac{w_1^{\ 2}}{2} = h_2 + \frac{w_2^{\ 2}}{2} \qquad \text{[J/kg]}$$

În cazul fluidelor incompresibile ($\rho_1 = \rho_2 = \rho = const.$), viteza rămâne constantă atât înainte cât şi după diafragmă:

$$w_1 = w_2 \quad \Rightarrow \quad h_1 = h_2$$

Turbina cu abur: Se consideră destinderea adiabatică a aburului într-o turbină.

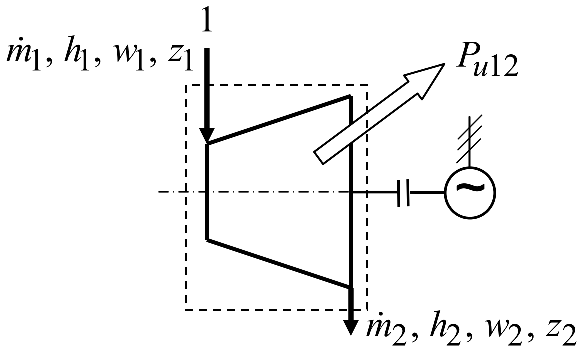

Fig. 2.4: *Turbina cu abur*

$$\dot{Q}_{12} = 0 \quad [\text{W}]$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad [\text{kg}]$$

$$w_1 = w_2 \quad [\text{m/s}]$$

$$z_1 = z_2 \quad [\text{m}]$$

Din expresia Principiului I pentru sisteme deschise, rezultă:

$$-P_{u12} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad [\text{W}]$$

$$P_{u12} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad [\text{W}]$$

Entalpia specifică la intrarea în turbină (h_1), depinde de presiunea şi temperatura aburului supraîncălzit, iar valorile uzuale ale acestora sunt: $p_1 > 30$ bar şi $t_1 > 650$ °C.

Turbina cu gaze de ardere: Se aplică aceleaşi condiţii ca şi în cazul turbinei cu abur, cu precizarea că entalpia poate fi exprimată ca produsul dintre căldura specifică la presiune constantă şi temperatura gazelor.

$$P_{u12} = \dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}\,\bar{c}_p\,(t_1 - t_2)$$

Temperatura gazelor la intrarea în turbină are valori de 850 ... 1100 °C.

Schimbătorul de căldură cu graniță internă: Se consideră un schimbător de căldură de tip țeavă-în-țeavă, în care agentul încălzitor (primar), notat cu indicele 1, cedează caldură agentului încălzit (secundar) notat cu indicele 2. Se notează cu prim (') parametrii de intrare şi cu secund (") parametrii de ieşire. Granița sistemului termodinamic analizat se alege în interiorul țevii cu diametrul mai mic.

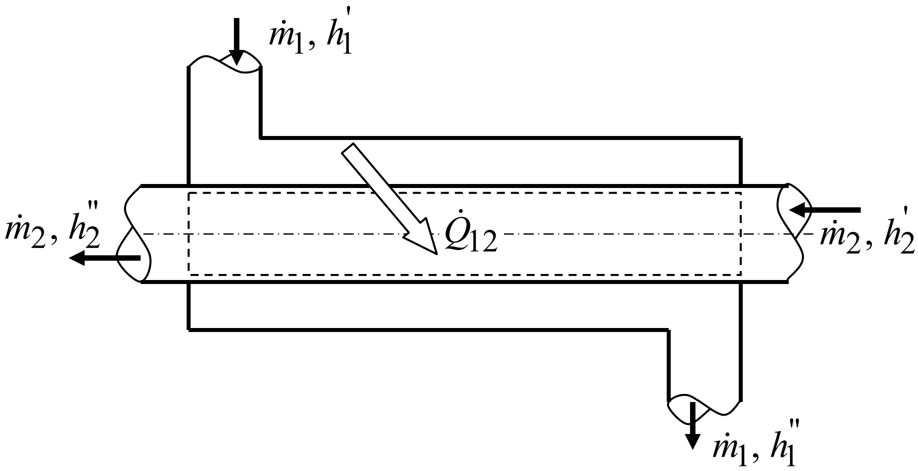

Fig. 2.5: *Schimbătorul de căldură cu graniță internă*

Remarcă: Agentul primar nu traversează granița sistemului.

$$P_{u12} = 0 \quad [\text{W}]$$

$$w_2' = w_2'' \quad [\text{m/s}]$$

$$z_2' = z_2'' \quad [\text{m}]$$

Conform Principiului I pentru sisteme deschise, rezultă:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_2 \left(h_2'' - h_2'\right)$$

În cazul în care agentul secundar este lichid sau gaz ideal, variația entalpiei poate fi exprimată ca produsul dintre căldura specifică medie la presiune constantă şi diferența de temperatură:

$$\Delta h = \overline{c}_p \, \Delta t \quad [\text{J/kg}]$$

Se obține astfel:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_2 \, \bar{c}_p \left(t_2'' - t_2'\right) \quad [\mathrm{W}]$$

Schimbătorul de căldură cu graniță externă: Se consideră acelaşi schimbător de căldură ca şi în cazul precedent, dar granița sistemului termodinamic se alege de această dată la exteriorul țevii mari. Se notează fluxul pierderilor de căldură de la agentul primar către exterior cu $\dot{Q}_p$.

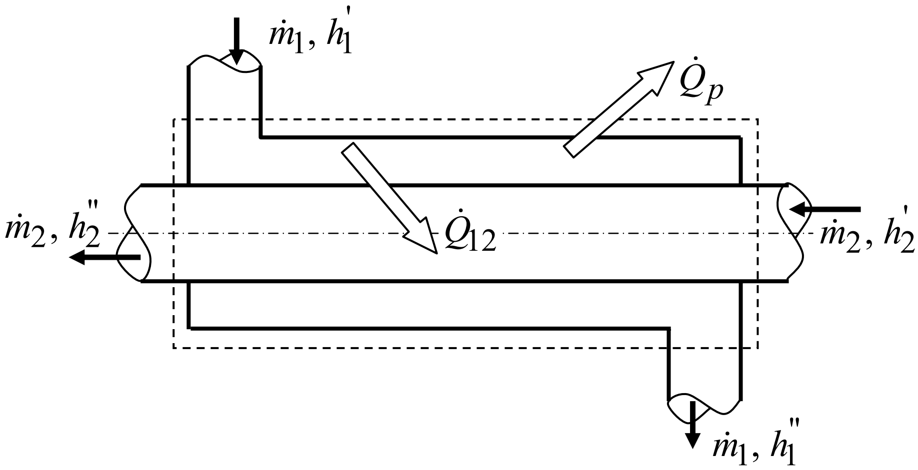

Fig. 2.6: *Schimbătorul de căldură cu graniță externă*

Remarcă: Fluxul de căldură transferat între cei doi agenți termici ($\dot{Q}_{12}$), nu va fi luat în considerație în exprimarea Principiului I deoarece nu traversează granița sistemului.

$$P_{u12} = 0 \quad [\mathrm{W}]$$

$$w_1' = w_1'' \quad [\mathrm{m/s}]$$

$$w_2' = w_2'' \quad [\mathrm{m/s}]$$

$$z_1 = z_2 \quad [\mathrm{m}]$$

$$-\dot{Q}_p = \dot{m}_1 h_1'' + \dot{m}_2 h_2'' - \dot{m}_1 h_1' - \dot{m}_2 h_2' \quad [\mathrm{W}]$$

$$\dot{m}_1 \left(h_1' - h_1''\right) = \dot{m}_2 \left(h_2'' - h_2'\right) + \dot{Q}_p \quad [\mathrm{W}]$$

Fluxul termic cedat de agentul primar este egal cu fluxul termic primit de agentul secundar plus pierderile către mediul exterior.

În cazul schimbătorului de căldură ideal (perfect izolat termic către exterior), nu există pierderi de căldură iar fluxurile de căldură schimbate între cei doi agenți sunt echivalente.

$$\dot{Q}_p = 0 \quad [\mathrm{W}]$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_1 \left(h_1' - h_1''\right) = \dot{m}_2 \left(h_2'' - h_2'\right) \quad [\mathrm{W}]$$